

Янин Е.П. Источники и особенности загрязнения речных систем в горнорудных районах // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2005, № 1, с. 2-33.

Введение

В настоящее время человеком используется более 150 видов минерального сырья, добываются миллиарды тонн первичных энергоносителей, строительных материалов, миллионы тонн минеральных удобрений, металлического и неметаллического сырья. Объемы добычи полезных ископаемых в мире увеличились с 225 млн. т в XIX в. до 25 млрд. т в начале 1980-х гг. [50]. Горнорудные ландшафты являются районами особенно активного техногенного преобразования окружающей среды. Это связано с изъятием и механическим нарушением значительных массивов земель и с интенсивным загрязнением среды обитания химическими элементами и их соединениями. «Рудная деятельность человечества, - в свое время подчеркивал В.И. Вернадский, - является одним из больших биогеохимических процессов современной эпохи и вносит новое в геохимию всех химических элементов» [12, с. 229].

Техногенные преобразования в горнорудных районах захватывают территории, многократно превышающие площади горных (земельных) отводов, проявляются в глубокой трансформации химического состава практически всех компонентов биосферы и являются главным фактором, сдерживающим социально-экономическое развитие данных регионов. Максимальная глубина известных карьеров достигает 1 км и более, шахт - 4 км, скважин - 7 км. Размеры зон влияния эксплуатируемых рудных месторождений на прилегающие территории достигают десятки, часто сотни квадратных километров (в исключительных случаях - тысячи квадратных километров); радиус образующихся при осушении месторождений депрессионных воронок составляет десятки километров (при понижении напоров, измеряемых иногда сотнями метров); техногенные геохимические аномалии в поверхностных водотоках прослеживаются на многие десятки километров. [14, 16, 19, 37, 38, 45, 46, 53, 63, 67, 68, 84-86, 92]. В отвалы и хвостохранилища ежегодно поступают миллиарды кубических метров отходов добычи и обогащения руд. В большинстве случаев степень извлечения из руд полезных компонентов относительно невелика. Часто из них извлекается только 1-3 компонента при содержании в рудах в несколько раз большего числа полезных компонентов. Известны многочисленные примеры многотоннажных потерь редких металлов при добыче и обогащении минерального сырья [62]. Из шахт, с рудников и обогатительных фабрик отводятся и сбрасываются в поверхностные

водные объекты значительные объемы сточных вод, содержащих взвешенные вещества, разнообразные органические и неорганические соединения. В атмосферу поступают огромные количества пыли, газов, химических элементов и их соединений.

Например, в Нижнетагильском горнодобывающем районе, на сравнительно ограниченной территории (порядка 14 тыс. га) уже более 200 лет интенсивно развивается горнорудное производство [16]. В настоящее время здесь 70% территории занято лесами, которые в значительной степени несут следы интенсивного техногенного воздействия, 20% представлены сельхозугодьями и агропромышленными комплексами, 6,5% (около 2270 га) - горными выработками (карьерами, отвалами, зонами сдвига), 1,5% - дорогами и прочими коммуникациями, 2% - рекреационными зонами. Глубина карьеров составляет 120-220 м, шахт - от 350 до 600-700 м. В районе шахт и карьеров произошло снижение уровня подземных вод на 200-500 м; наблюдается частичная потеря речного стока; активизируются процессы техногенного выветривания, карст, оползни, обрушения, провалы, заболачивание и поверхностная эрозия. Глубина воронок обрушения часто достигает 100 м, при крутизне откосов до 70°. Значительные нарушения земной поверхности происходят и в зонах сдвига пород, достигающих ширины 500 м. В поверхностных водах отмечено значительное увеличение содержания сульфатов, соединений азота, присутствуют нефтепродукты и фенолы. Подземные воды района характеризуются увеличением общей минерализации (в 1,5-3 раза по сравнению с фоном), снижением pH (до 3,5), ростом содержания соединений азота, повышенными концентрациями нефтепродуктов и некоторых металлов. Территории с нарушенным режимом подземных вод в 9,3 раза превышают площадь всех горных выработок; участки с загрязненными почвами в 7,1 раза; зоны влияния рудничного водоотлива в 2,5 раза; участки интенсивного техногенного изменения поверхности и горных пород массива в 2,2 раза, а рудничными стоками интенсивно загрязнена площадь, равная площади всех горных выработок. Водохранилища и отстойники составляют 50% площади, занятой горными выработками, а площади техногенного заболачивания - более 30%. При этом в большинстве случаев контуры почти всех указанных нарушений в пределах данного горнорудного района не совпадают, т. е. фактическая площадь техногенных нарушений среды обитания значительно превышает приведенные выше максимальные показатели.

В середине 1980-х гг. в мире действовало свыше 40 тыс. горнодобывающих предприятий с общим объемом переработки горной массы около 30 млрд. м³ в год [39]. В России до недавних пор функционировало около 1000 шахт и подземных рудников, а также порядка 5000 карьеров, разрезов и приисков. Экологическая ситуация в горнодобывающем комплексе страны в целом оценивается как неудовлетворительная, а в отдельных районах - как кризисная [20-24].

По прогнозам, в самое ближайшее время горнопромышленная деятельность еще более активизируется, что, соответственно, приведет к еще большему росту техногенной нагрузки на окружающую среду в горнорудных районах. Например, только в США в результате горных работ, связанных с добычей различных металлов, к началу 2000 г. должны были измениться экологические условия и ландшафты на площади в 240 тыс. км² [108]. В ходе обогащения, предварительной переработки и плавки металлов непосредственно в водные объекты будет выброшено от 7000 до 70000 т различных химических элементов (As, Cd, Pb, Zn и др.). В настоящее время наблюдается существенный рост количества отходов горного производства в связи со снижением среднего содержания металлов в добываемых рудах [41]. Так, по мере того как среднее содержание меди в руде, добываемой в шт. Монтана (США), снизилось с 30 до 0,5%, а количество отходов при обогащении в расчете на 1 т металла увеличилось с 3 до 200 т. Авторы цитируемой работы обоснованно полагают, что в недалеком будущем может даже сложиться ситуация, когда стоимость обогащения руды будет превышать стоимость произведенного металла. По замечанию А.У. Манна [88], в состоянии равновесия цикл минеральных ресурсов аналогичен гидрологическому циклу, т. е. не рециркулирующие отходы должны возмещаться за счет первичного материала. Доля рециркулирующего материала играет важную роль в определении скорости истощения того или иного ресурса. При этом чем выше степень рециркуляции полезного компонента, тем ниже техногенная нагрузка на среду обитания.

В общем случае в горнорудных районах в пространственном отношении рационально различать зону непосредственного воздействия месторождения на природную среду и зону внешнего влияния, в пределах которых формируются два типа геохимических аномалий (т. е., в сущности, зон загрязнения): природные (рудогенные) аномалии, обусловленные естественными процессами, и техногенные аномалии, связанные с основными видами производственной деятельности: геологоразведочными работами, горнорудными работами (добыча руд), горно-обогащительными (обогащение руд) работами, иногда с металлургическим (химическим) переделом руд, а также с сопутствующей хозяйственно-бытовой деятельностью.

Природные геохимические особенности горнорудных территорий

Специфика состояния окружающей среды в районах рудных месторождений в общем случае зависит от геолого-геохимических особенностей последних, проявляющихся различием ассоциаций химических элементов в миграционных цепях, формирующих природные (рудогенные) геохимические аномалии. Степень экологической опасности природных миграционных цепей определяется видом, минералого-геохимическим классом и минеральным типом полезного ископаемого, коэффициентом рудоносности, интенсивностью проявления первич-

ных ореолов, характером эрозионного среза рудных полей и месторождений, ландшафтно-геохимическими условиями развития ореолов и потоков рассеяния. В потенциале практически любое рудное месторождение представляет собой комплексный источник химического загрязнения окружающей среды, что в существенной мере связано с присутствием повышенных концентраций широкого комплекса химических элементов в рудах и вмещающих горных породах. Комплексность месторождений как источников загрязнения проявляется также в разнообразии охватываемых химическим загрязнением природных компонентов [65-68].

Основными источниками загрязняющих веществ в горнорудных районах являются руды и рудовмещающие породы, в которых формируются первичные геохимические ореолы, причем пространственные размеры последних и количество (масса) заключенных в них химических элементов, как правило, превышают параметры рудных тел, вокруг которых они образуются [4, 26]. Хорошо известно, что в состав первичных ореолов входят как главные рудные компоненты, определяющие промышленный тип месторождения, так и ряд сопутствующих химических элементов (табл. 1, 2).

Таблица 1. Геохимические ассоциации элементов, концентрирующихся в некоторых типах рудных месторождений и сопровождающих их ореолах рассеяния [26]

Тип месторождения	Геохимическая ассоциация
Апатитовые	P-Sr-Ce-La-Y-Yb-Zr-Nb-Mo-Pb-Ba-Sn-Ni-Co-Zn-Cr-V-Sc-Ga-Mn
Кимберлиты	Co-Ni-Cr-Pb-Zn-Ag-Cu-B-Mo-Sn
Редкометалльные пегматиты	Li-Pb-Cs-Nb-Sn-Ta-W-Be-As
Медно-никелевые	Cu-Ni-Co-Ba-Pb-Zn-Ag-Bi-Sn-Be-W-Zr
Медно-колчеданные	Ba-Ag-Pb-Cd-Zn-Bi-Cu-Co-Mo
Железорудные в скарнах	Mn-Pb-Cu-Zn-Ni-V-Sn-Sr-B-Zr-Mo-Co-Fe-Ti-Cr-Y-Sc
Вольфрам-молибденовые в скарнах	Ba-Ag-Pb-Zn-Sn-Cu-W-Mo-Co-Ni-Be-V-Y
Висмутовые в скарнах	As-Pb-Ag-Zn-Co-Cu-Bi-Ni
Оловорудные	Sn-Pb-As-Cu-Bi-Zn-Ag-Mo-Co-Ni-W
Полиметаллические в скарнах	Sb-Cd-Ag-Pb-Zn-Cu-Ni-Bi-Co-Mo-Sn-W-Be
Золоторудные	Au-Sb-As-Ag-Pb-Zn-Mo-Cu-Bi-Co-Ni-W-Be
Медно-порфиновые	Ba-As-Sb-Ag-Pb-Zn-Au-Bi-Cu-Mo-Sn-Co-W-Be
Медные	Ba-As-Pb-Zn-Ag-Sn-Cu-Bi-Co-Ni-Mo
Медно-молибденовые	Cu-Mo-As-Ag-Pb-Zn-Bi-Co-Ni-Be-W
Полиметаллические	Ba-Sb-As-Ag-Pb-Zn-Cu-Bi-Mo-Co-Sn-W
Урановые	U-Ag-Pb-Zn-Cu-Mo-Co-Ni-Y
Сурьмяно-ртутные	Sb-Hg-As-Cu-Ag-Pb-Zn-Be-Co-Ni-W-Sn
Ртутные	Hg-Ba-Ag-Pb-Zn-Cu-Co-Ni-Sn-Mo-W
Стратиформные свинцово-цинковые	Ba-As-Cu-Ag-Pb-Zn-Co-Ni-Be-V
Медистые песчаники	Cu-Ag-Pb-Ba-Bi-W-Cr-Zn-Mo

Необходимо отметить, что геохимические ассоциации, характерные для руд и первичных ореолами, в качественном отношении изучены недостаточно полно, так как ориентированы главным образом на перечень элементов, используемых в качестве индикаторов при поисках месторождений. В большинстве случаев рассматривались химические элементы, ореолы

которых удавалось обнаружить, применяя экспрессный спектральный анализ. В то же время еще Н.И. Сафронов [71] указывал на присутствие (в повышенных количествах) в первичных ореолах постмагматических месторождений практически всех 58 главных рудообразующих и сопутствующих элементов. Исследования Э.Н. Баранова [4] показали, что, например, в рудах колчеданных месторождений, помимо основных рудообразующих элементов (Fe, S, Cu, Zn, Pb, Ba), постоянно присутствуют в повышенных концентрациях многочисленные элементы-примеси (Au, Ag, As, Sb, Cd, Hg, Bi, Sn, Se, Te, Ge, Ga, Tl, In, Mo, Co). Ореолы около колчеданных месторождений образуют также элементы-примеси вмещающих пород (Mn, Ni, V, Cr, Ti, Sc, Sr) и элементы широкого рассеяния (J, Br, Cl, F). В увеличенных количествах в околорудных измененных породах могут находиться и породообразующие элементы (K, Na, Ca, Mg, P). Автор цитируемой работы установил, что в формировании элементного состава эндогенных геохимических ореолов колчеданных месторождений участвует по меньшей мере 47 химических элементов. Аналогичная полиэлементность состава установлена для ореолов многих других типов месторождений. Лишь в редких случаях встречается ограниченная группа месторождений, вблизи которых геохимические ореолы практически отсутствуют или проявлены слабо. Первичные и вторичные ореолы рассеяния золоторудных месторождений плутонических и вулканогенных формаций отличаются высокими концентрациями аммония [30, 89].

Таблица 2. Перечень устойчивых ассоциаций наиболее распространенных элементов-спутников различных руд [51]

Главный металл	Элементы-спутники
Fe	Mn-Ti-V-Co-Pt-Cu-Zn-S-P-As-Pb-Ga-Ge-B-Ni-Cr
Cu	Au-Ag-Se-Tl-Re-Co-Mo-Pb-Zn-Ge-Cd-In-As-Sn-Bi-Hg-Ni
Pb	Zn-Cu-Sn-Ag-Au-Bi-Sb-As-Se-Tl-Cd-In-Ge-Ga-Hg-Co-Ba
Zn	Pb-Cu-Sn-Ag-Bi-Sb-As-Tl-Se-Te-Ge-Au-Co-Cd-Ni-In-Hg-Ba-Ga
Ni	Co-Cu-Pt-Pd-Ir-Rh-Os-Ru-Au-Ag-Se-Te
Sn	Cu-Pb-Bi-Ag-Hg-Ta-Nb-In-Sc-W-Se-Tl-As-Zn-Co-Cd-Mo
Al	V-Ti-Ga-Cr-Mn-P-F-Nb-Zr-La-As-U-Th
Ti	V-Cu-Co-Pb-Zn-Cr-Mn-P
Mo	W-Sn-U-Cu-Zn-Pb-Re-Mn-Ge-Te-Se-Tl-In-As-Sb-Bi-Ag-Au-Co-Cd-Hg-Th-Gd-Yb-Y-Ce-Sm-Eu-Nd-La-Ni-Nb-Ta
W	Mo-Mn-Bi-Au-Cu-Zn-As-Pb-Tl-Se-Ag-Sc
Ta, Nb	W-Sn-Li-Be-Zr-Cs-Rb-In-Sc-Hg-Ag-Bi-Pb-Cu
Tr	Ta-Nb-Ti-U-Th-Hf-Zr-Y
Mn	Fe-Cu-Ni-Co-V-Cr-P-Pb-Zn-As-Ba-Ag-Sb
Cr	P-Ni-V-Co-Mn-Ti

Очень показательное концентрирование в рудах и рудовмещающих породах различных месторождениях такого токсичного элемента, как ртуть. Исследования последних лет показали, что этот металл образует заметные концентрации в колчеданных, полиметаллических, медных, золотосеребряных и других месторождениях [4, 5, 7, 52, 82, 83] (табл. 3). Высокие содержания ртути, обуславливающие необходимость попутного извлечения ее при металлур-

гическом переделе, обнаружены в цинковых концентратах, получаемых из руд медно-колчеданных месторождений Урала (концентрации ртути находились в пределах 20-93 мг/кг) [48]. В процессе переработки медно-колчеданных руд на Учалинском ГОКе происходит перераспределение ртути, в результате чего 95-98% общего количества ее в составе концентратов уходит на металлургические заводы (табл. 4). Ртуть в значимых количествах содержится в окисленных рудах медно-колчеданных месторождений Юж. Урала, из которых в течение 50 лет на Семеновской золоизвлекательной фабрике получают цианированием золото и серебро [48]. По данным авторов цитируемой работы, концентрации Hg в материале хвостохранилищ фабрики варьируются в пределах 8,8-67,8 мг/кг, а общая масса ее составляет около 60 т. Последнее время фабрика работает на руде Гайского месторождения, с которой ежегодно поступает около 0,4-0,5 т ртути. В рудах месторождений золотосеребряной формации Северо-Востока России также отмечены высокие концентрации этого металла (от 8,1 мг/кг для месторождения Карамкен до 75 мг/кг для месторождения Валунистое) [72]. На Лениногорской обогатительной фабрике до 70-90% ртути переходило в хвосты коллективной флотации [5]. В медных рудах, ежегодно добываемых на месторождении Сафьяновское (Свердловская область) содержится до 10 т ртути, которая при переработке их не извлекается и теряется в ходе технологических процессов. В Казахстане при переработке полиметаллических руд месторождений Рудного Алтая (Риддер-Сокольного, Зыряновского и др.) и центральных районов страны (Жайремского, Кайгарлинского и др.) ежегодно теряется до 50 т ртути [44].

Таблица 3. Масштабы ртутоносности различных месторождений [5]

Тип месторождения, тип и сорт руды	Ртутоносность, т
Медно-колчеданный, медно-цинковые	n 1000
Медно-порфировый, молибдено-медные	n 10
Медистые песчаники, существенно медные	n 10
Медно-никелевый	n 10
Стратиформный, свинцово-цинковые баритсодержащие	n 1000
Колчеданно-полиметаллические, медно-свинцово-цинковые	n 10
Скарновый и метасоматический, свинцово-цинковые	n 10
Жильный, свинцово-цинковые	n 10
Бокситовый	n 10
Алунитовый	n 10
Железорудный	n 10

Таблица 4. Распределение ртути в рудах и продуктах их переработки [15]

Фракция	Hg, мг/кг (среднее)	Относительное количество Hg, %
Руда	10-25	100
Медный концентрат	28-41	10-14
Цинковый концентрат	76-123	35-48
Пиритный концентрат	5-15	36-50
Хвосты	1-9	2-5

Особую группу потенциальных поллютантов составляют различные органические соединения, присутствующие в рудах и рудовмещающих породах. Так, практически во всех гидротермальных рудных образованиях, независимо от характера вмещающих пород и типа руд, присутствуют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Они обнаружены в рудах и минералах полиметаллических, золоторудных, ртутных, ртутно-сурьмяных, ртутно-вольфрамовых, оловорудных, флюоритовых, пегматитовых месторождений [8-11, 17, 56]. Органические соединения обнаружены более чем в 80 видах твердых полезных ископаемых. Всего к настоящему времени в рудах различных месторождений выявлено свыше 120 индивидуальных органических соединений. Достаточно надежно идентифицированы: 1) предельные и непредельные углеводороды (метан, этилен, пропилен, бутилен, амилен, гексан, гептан, октан и др.), общее количество которых изменяется в пределах от 0,2 до 7,8 см³/кг породы; 2) полициклические ароматические углеводороды (бензпирен, нафталин, флуорантен и др.), общая концентрация их достигает 0,06-0,42 мг/кг; 3) амины (метиламин, делитиламин, этиламин и др.). Установлено также наличие гетероциклических соединений, аминов, цианидов, спиртобензольных смол, минералов группы парафинциклопарафинов.

В разрезе зоны гипергенеза рудных месторождений четко прослеживается дифференциация ассоциаций химических элементов в зависимости от характера вертикального профиля коры выветривания, типа вмещающих пород и степени концентрации сульфидов [64]. Сравнение интенсивности процессов перераспределения элементов в горизонтах окислительного типа для следующего ряда вмещающих пород: силикатные (кремнистый тип коры выветривания) - алюмосиликатные (глинистый тип коры) - карбонатные (карбонатно-глинистый тип коры) показывает, что для руд и первичных ореолов существуют контрастные и однонаправленные тенденции в изменении характера перераспределения типоморфных элементов. В породах кремнистого состава при выветривании часто наблюдается резкая дифференциация в поведении химических элементов. Многие из них здесь очень миграционно подвижны и энергично выносятся (Zn, Co, Cu, Cd, Se - почти всегда, Pb, As - часто, но особенно при обилии пирита). Другие элементы (Mo, Ag, Ba) иногда накапливаются (с гидрооксидами железа). В породах алюмосиликатного состава подвижность многих химических элементов уменьшается в связи с появлением сорбционного барьера. В условиях выветривания рудовмещающих пород даже Zn часто становится малоподвижным. В основном энергично выносятся только лишь аниогенные элементы (Se, Te). Однако уменьшение подвижности элементов наблюдается далеко не всегда, поскольку оно обусловлено временными соотношениями между процессами образования глинистых минералов и окислительным разрушением сульфидов. В породах карбонатно-глинистого состава тенденция уменьшения подвижности элементов проявлена осо-

бенно контрастно. Даже в условиях выветривания относительно богатых руд большинство химических элементов ведет себя сравнительно инертно.

В результате природных гипергенных процессов происходит разрушение рудных месторождений, обуславливающее перераспределение вещества руд и первичных ореолов в окружающем пространстве и приводящее к образованию вторичных геохимических ореолов (в почвах и рыхлых отложениях) и потоков рассеяния (в донных отложениях водотоков), которые часто блокируются в сближенные серии, характеризующие оруденение рудных полей, узлов и районов [27, 42, 43, 51, 60, 64, 78]. Обычно площади рудных полей колеблются от единиц квадратных километров до 20 км², в редких случаях достигая нескольких десятков квадратных километров. Площади месторождений в среднем на порядок меньше площадей рудных полей, а площади рудных тел - на порядок меньше площади месторождений. Площади аномальных геохимических полей, соответствующие потенциальным рудным полям, в среднем составляют 15-80 км² (изменяясь в пределах 8-180 км²). Минимальные площади (8-40 км²) характерны для аномальных геохимических полей грейзеновых, пегматитовых, кварцево-жильных рудных полей месторождений W, Au, Sb, Hg, Sn, а максимальные (10-180 км²) - для колчеданных, медно-порфировых, стратиформных и жильных полиметаллических, медно-никелевых, урановых, сурьмяно-ртутных. В большинстве случаев состав аномальных геохимических полей, как правило, комплексный с преобладанием одного или нескольких основных рудообразующих элементов, которые наиболее широко распространены не только в центральных, но и в периферических частях выделяемых геохимических полей. Менее контрастные, но относительно большие по размерам аномальные поля образуют химические элементы и соединения широкого рассеяния (ртуть, галогены, щелочные металлы, битумы). Например, площадь рудного поля одного из сульфидных месторождений составляет 250 км², из них на 120 км² концентрации Pb, Cu, Zn, Co, Mo в почвах превышают фоновые значения в 5-10 раз и на площади 25 км² - более чем в 10 раз [67]. Показательно, что из девяти населенных пунктов, расположенных в пределах данного рудного поля, семь находятся на территории с высоким содержанием химических элементов. Для другого крупного региона развития сульфидно-касситеритовых месторождений по поисковым геохимическим данным выявлены три типа аномалий с весьма токсичным комплексом элементов в ассоциации: Hg, Pb, As, Zn, Cu, Sn, Sb, Mn. Общая площадь проявления геохимических аномалий в почвах составляет почти 5000 км², причем концентрации свинца достигают 0,1-0,5%, ртути - 0,001%, что многократно выше ПДК.

Размеры и морфология вторичных геохимических ореолов, являющихся, в свою очередь, источниками поставки вещества для потоков рассеяния, а также средняя протяженность последних, их минимальная и максимальная длина для большинства рудных месторождений

достаточно близки [27, 60, 64, 78]. Различия проявляются в составе и интенсивности концентрирования химических элементов. В большинстве случаев вторичные геохимические ореолы и потоки рассеяния характеризуются полиэлементным составом. Содержания химических элементов (рудобразующих и элементов-спутников) во вторичных ореолах и потоках рассеяния обычно не более чем в 10-15 раз превышает фоновые значения; лишь в центральных и очень локальных зонах ореолов ($0,0n \text{ км}^2$), непосредственно трассирующих рудные тела, интенсивность их концентрирования может быть существенно выше.

Для рудных потоков рассеяния, развитых в донных отложениях водотоков, поставка химических элементов связывается с деятельностью эрозионных и склоновых процессов (в основном поступление механических продуктов разрушения руд, рудоносных пород, первичных и вторичных ореолов) и с выходом подземных вод (преимущественное поступление растворенных веществ). Интенсивность эрозионных и склоновых процессов зависит от физико-географических особенностей территории, что позволяет говорить о географической зональности поставки твердых веществ в реки горнорудных районов. Как правило, наблюдается относительно равномерное в разрезе года поступление растворенных веществ в рудные потоки с грунтовыми и подземными водами. Поставка твердых веществ распределена во времени крайне неравномерно: до 70-99% годового стока взвешенных веществ приходится на периоды половодий и паводков. Состав ассоциаций химических элементов, накапливающихся в аллювии, обычно хорошо коррелирует с минералого-геохимическими особенностями дренируемых месторождений [43, 58, 69, 101]. Особенности пространственного распределения химических элементов в рудогенных потоках рассеяния (в аллювии) в значительной степени находятся в зависимости от положения рудопроявлений и месторождений в долине. Наиболее интенсивные геохимические аномалии в основном совпадают с участками рудопроявлений и месторождений. В пространственном плане характерно наличие двух участков - головной части потока (на котором поступают рудные вещества) и шлейфа, где происходит перенос поступившего в поток рудного материала. Головная часть отличается резким, скачкообразным возрастанием концентраций химических элементов в отложениях с незакономерными их колебаниями. Протяженность ее зависит от размеров месторождений и положения русла по отношению к долине. В вертикальном разрезе рудогенные потоки рассеяния отличаются развитием двух горизонтов - нижнего (образован осадками более древних русел) и верхним (горизонт современных русловых и пойменных отложений). Как правило, потоки рассеяния в действующих руслах находятся в тесном взаимодействии с потоками рассеяния, прослеживаемых в отложениях поймы. Имеются указания на развитие более контрастных потоков в грубообломочных отложениях, нежели в тонких фракциях горного аллювия [58, 102]. Очень часто формируются так называемые прерывистые потоки рассеяния, характеризующиеся наличием нескольких экс-

тремумов. Фиксируемая неоднородность распределения металлов в потоках рассеяния горных районов объясняется несколькими причинами, основной из которых является неравномерность денудационных процессов [49]. По мере удаления от коренного источника взаимоотношения и характер корреляционных связей между содержаниями рудных элементов в русловых отложениях отличаются от характеристик коренного оруденения [43]. Обычно наибольшая степень схождения характерна для водотоков 1-2 порядков. Материалы, приводимые В.В. Поликарпочкиным [58], свидетельствуют, что протяженность потоков рассеяния в отложениях горных и полугорных рек в зоне влияния разных типов месторождений обычно составляет до 1-3 км, иногда до 10 км и более. В высокогорных ландшафтах Центр. Кавказа протяженность аллювиальных потоков рассеяния свинца составляет 0,6-1,5 км, максимальная до 2,5-3 км. Для других металлов (Cu, Zn) протяженность (прерывистых) потоков достигает 0,1-0,3 км [49].

В естественных условиях общий химический состав воды горных рек зависит от источников питания и во многом определяется типом слагающих водосборы горных пород (табл. 5). Как правило, минимум минерализации приурочен к сезонам таяния ледников и снегового покрова, максимум - к зимнему времени, когда в питании речного стока заметно преобладают грунтовые и подземные воды. Реки, дренирующие гранитные породы отличаются более низкой минерализацией, нежели реки, бассейны которых сложены известняками. Сланцевые водосборы занимают промежуточное положение.

Таблица 5. Химический состав рек бассейна Ардона (Северная Осетия), мг/л [61]

	Весна			Лето			Осень			Зима		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ca ²⁺	9,8	14,6	39,9	12,1	16,5	39,7	13,4	21,4	46,6	14,8	27,5	44
Mg ²⁺	1,0	3,1	6,1	1,0	3,7	9,9	0,9	4,2	3	2	5	13,3
Na ⁺ +K ⁺	3,0	5,5	3,8	1,4	3,4	5,3	3,7	5,2	9,5	5,5	9,1	11,6
HCO ₃ ⁻	28,7	49,9	131,3	30,5	48,1	133,7	34,8	74,8	159	52,8	79,1	183
SO ₄ ²⁻	9,1	15,3	17,9	8,8	17,3	32	11,9	14,6	17,9	18,9	38,3	34,5
Cl ⁻	1,9	2,7	3,1	2,2	3,6	7,9	2,8	3,8	2,3	0,9	3,2	2,1
Σ _и	45	73	137	45	80	175	71,1	97	170	78	147	202,5

Примечание. Породы, слагающие бассейн: 1 - граниты, 2 - сланцы, 3 - известняки.

Рудные месторождения характеризуются присущими им гидрогеохимическими полями, в структуре которых различают области развития рудных вод (ареал) и ореольных вод (ореол) [25, 33, 36]. Рудные воды формируются в непосредственной близости от рудного тела (пространственно совпадают с источником рассеивающего вещества) и характеризуются, как правило, незакономерным и неупорядоченным по отношению к потоку подземных вод пространственным распределением рудных компонентов. Ореольные воды представляют часть гидрогеохимического поля за пределами источника рассеивающего вещества, внутри которого в соответствии со структурой потока происходит закономерное уменьшение концентраций элементов (пространство от границы рудных вод до фоновых). Гидрогеохимические поля рудных

месторождений, рудные и ореольные воды практически всех известных типов рудных месторождений характеризуются повышенными концентрациями достаточно широкого комплекса макро- и микроэлементов, содержания которых могут заметно превышать фон (табл. 6, 7).

Таблица 6. Комплекс элементов, присутствующих в аномальных концентрациях в гидрогеохимических полях некоторых рудных месторождений [33]

Месторождение	Специфические элементы в водах	Полный комплекс элементов в водах
Уран-редкометальное	U-Sn	Al-Ti-V-Ga-Zr-Y-Yb-Be-Mo-F-Cl-Na-Cu-Zn-As-Sn
Кварц-золотое	Au-Ag	Ti-V-Ga-Zr-Be-Cu-Zn-Fe-Mn
Кварц-касситеритное	Sn	Al-Ti-V-Ga-Y-Yb-Mo-As-Zn
Урановое	U	Ti-V-Zr-Mo-F-Y-Zn
Касситерит-вольфрамитовое	Sn-W	Ti-V-Ga-Y-Be-Mo-Zn-Cu
Кассетерит-шеелит-вольфрамитовое	Sn-W-Bi	Al-Ti-V-Ga-Zr-Sc-Cu
Кассетерит-вольфрамитовое	Sn-W	Al-Ti-V-Ga-Zr-Be-Yb-Zn-Cu
Титано-магнетитовое	Ti-Fe-Cr-V	Al-Ga-Mg
Золотосеребряное	Au-Ag-K	Zn-Cu-As-Al-Ti-V-Ga-Y-Yb-Be
Сульфидные медно-никелевые	Co-Ni-Fe	Zn-Cu-As-Ti-Al-V-Ga-Cr-Mg

Таблица 7. Химические элементы в рудных и ореольных водах близповерхностных золотосеребряных гидротермальных вулканогенных месторождений Северо-Востока и Дальнего-Востока России, мкг/л [33]

Компонент	Рудные воды	Ореольные воды	Фоновые воды
Золото	n	$n \times 10^{-2}$	< 0,005
Серебро	до 5	0,07	0,01
Цинк	10-30	0,3-0,5	< 0,1
Медь	1-5	$n \times 10^{-1}$	0,1-0,2
Мышьяк	1-10	1-2	0,5
Марганец	20-100	25-30	1-3
Кобальт	1-5	0,5	< 0,5
Сульфат-ион	20000-100000	12000-16000	1000-2000
Титан	100-500	100-200	20-70
Алюминий	1000-10000	3000	100-300
Галлий	0,3-1	0,3	< 0,3
Бериллий	0,1-1	0,1-0,2	< 0,1
Ванадий	0,5-3	0,5	< 0,5
Калий	1500-2000	до 2000	100-400

Обычно протяженность гидрогеохимических ореолов и потоков рассеяния, формирующихся в окрестностях рудных месторождений, относительно невелика и составляет в пределах придолинного ландшафта первые сотни метров, реже 1-2 км, в пределах приводораздельных ландшафтов гумидного климата - 0,5-3 км, иногда до 5-8 км; в условиях аридного климата - не превышает 0,5-2 км [33, 35, 36] (табл. 8). Материалы, систематизированные В.В. Поликарпочкиным [58], также свидетельствуют об относительно незначительной длине рудогенных потоков рассеяния химических элементов в поверхностных водотоках: обычно от первых сотен метров до первых километров, в редких случаях до 13-17 км.

Таблица 8. Основные гидрогеохимические признаки рудных месторождений Якутии (по В.М. Макарову, цит. по [33])

Месторождения	Прямые признаки	Косвенные признаки	Характеристика ореолов и потоков рассеяния
Золоторудные: Плащеобразные залежи окисленных руд в карстовых депрессиях Крутопадающие жилы и сопряженные с ними субгоризонтальные залежи полисульфидного и пирит-анкеритового составов	Au Au	Ag, Mn, Sb, Sn, Ti, Be, SO ₄ ²⁻ Zn, Pb, Ag, Sn, Mo, Be, SO ₄ ²⁻	Площадь ореолов до первых десятков кв. км Протяженность потоков 0,4-8,1 км
Золотосурьмяные: Зоны дробления с золотоносными кварц-антимонитовыми жилами, линзами, гнездами	Sb, Au	As, Hg, Co, Ga, Pb, Ge, SO ₄ ²⁻	Площадь ореолов до первых десятков кв. км, протяженность потоков 0,4 км
Оловорудные: Сульфидно-касситеритовые Оловянно-редкометалльные	Sn Sn, Li	As, B, F, Pb, Zn, Hg, Cu, SO ₄ ²⁻ As, Bi, Ag, Be, P	Площадь ореолов – первые кв. км, протяженность потоков до 1 км Протяженность потоков – первые километры
Медно-вольфрамовые и вольфрамовые	W, Sn, Cu	As, Zn, B, Co, Be, Ba	Протяженность потоков – первые километры
Полиметаллические	Pb, Ag, Zn	Sn, Cd, Cu, As, Hg, Ge, SO ₄ ²⁻	Площадь ореолов 1-6 км ² ; протяженность потоков 1-4 км
Ртутные	Hg	Sb, As, Ba, SO ₄ ²⁻	Протяженность потоков до 1 км
Медно-никелевые	Cu, Ni	Ti, Mn, Zn, Cr, Ag, V, Pb, Co, Zr, Sn	Протяженность потоков 0,5-1 км
Алмазные (кимберлитовые трубки в карбонатных породах)		Nb, Cr, Mn, Ti, V, Ag, As, Ga, Co	Слабоконтрастные прерывистые ореолы площадью (0,1-1) км ²

В освоенных горнорудных районах главным фактором преобразования природной среды являются техногенные процессы, проявляющиеся уже на стадиях поисков и разведки и интенсифицирующиеся при эксплуатации месторождений. Разработка рудных месторождений на несколько порядков увеличивает физико-химическую денудацию, миграционную способность многих химических элементов и объем их поставок в природные воды, что в конечном счете приводит к коренному преобразованию геохимического облика водотоков. В общем случае эти изменения зависят от типа месторождения, гидрогеологических и ландшафтно-геохимических условий водосбора (особенно важно различать гумидные и аридные ландшафты), контролирующей интенсивность вторичных изменений горных пород, а также от принятой системы добычи, обогащения и передела минерального сырья. Особое значение имеют такие факторы, как количество сульфидов в разрабатываемой горной массе, состав рудовмещающих пород, степень проработки сульфидсодержащих пород процессами окисления, время

существования поверхностных техногенных осадочных образований, степень очистки стоков и способ хранения отходов, интенсивность поставки твердого материала [2, 3, 29, 54, 55, 65-69, 105, 107, 110]. Необходимо отметить, что при отсутствии в горнорудном районе предприятий по пирометаллургическому переделу руд основным объектом техногенной геохимической трансформации являются, как правило, именно водные системы.

Обычно на ранних стадиях освоения месторождения состав химического загрязнения соответствует геохимической специализации территории. По мере увеличения степени освоения месторождения интенсивность техногенного воздействия увеличивается, а качественный состав загрязнения может резко меняться. С эколого-геохимической точки зрения наиболее опасными являются промышленно-генетические типы месторождений, разработка которых приводит к резкому увеличению мощности зоны гипергенеза и изменению условий миграции поллютантов. Как показано Б.А. Колотовым [34], наиболее существенные изменения важнейших условий миграции химических элементов (окислительно-восстановительного потенциала, кислотно-щелочного равновесия, доминирующих видов лиганд, способствующих водной миграции элемента) будут происходить при разработке сульфидных месторождений, характеризующихся наличием в рудах большого количества двойных сульфидов (pH 2-4, Eh до 700 mV), - колчеданных, магматических ликвационных, стратиформных медно-полиметаллических и др. В водах этих месторождений будут концентрироваться значительные количества тяжелых металлов переходных периодов с низкой валентностью (Pb, Zn, Cu, Co, Ag, Ni и др.). Полярная этой группе по рассматриваемым показателям - группа месторождений, связанных со щелочными породами (позднемагматические, карбонатитовые), в водах которых (pH 8,5-12, Eh 200 mV) накапливается значительное количество лигандо-комплексобразователей, способствующих миграции химических элементов. В щелочных водах наиболее активно мигрируют токсичные элементы с высокой валентностью (TR, Cr и др.) и аниогенные элементы (F, As). При этом в общем случае, с экологических позиций, наиболее опасным представляется разработка месторождений в северных тундрово-лесных районах, где развиты процессы выщелачивания (Кольский п-ов, район Норильска, Чукотка).

Особенности и пути поступления загрязняющих веществ в водотоки

В горнопромышленных районах, связанных с добычей, обогащением и переработкой различных руд, резко меняются характер и интенсивность поступления химических элементов в водные системы. Это связано с изменением масштабов и интенсивности механической и водной миграции, что обусловлено перемещением больших масс горных пород и их последующим перераспределением в отвалах под действием гравитационных процессов, разруше-

нием хвостохранилищ под влиянием экзогенных факторов, поступлением сточных вод с рудников, обогатительных фабрик, шламоохранилищ и металлургических предприятий, а также поверхностного стока с территорий, загрязненных промышленными выбросами и отходами.

В общем случае в горнорудных районах образуются три группы отходов, являющихся источниками поступления поллютантов в окружающую среду: твердые отходы (отвалы пустых пород, хвосты обогащения, шламы металлургических предприятий и др.), разнообразные сливы и сточные воды, пылегазовыбросы в атмосферу. В свою очередь, можно выделить два основных способа поставки загрязняющих веществ в поверхностные водотоки: со сточными водами, возникновение которых связано с техногенной деятельностью, и с водами поверхностного (склонового) стока, формирующихся при таянии снегового покрова и(или) во время дождей.

Горное производство отличается значительными объемами потребляемой воды. Например, укрупненные нормы расхода воды при добыче 1 т полиметаллических руд открытым способом составляют 0,15 м³, подземным - 3,05; обогащение 1 т полиметаллической руды - 1,23 м³, медных - 1,02-4,46 м³. Нормативы водопотребления на металлургических заводах еще более высоки (в 2-15 раз) [81]. Объемы отводимых сточных вод в горнопромышленных районах чрезвычайно велики. Так, на медно-цинко-пиритном руднике Фиасалми (Финляндия) общий водосток достигал около 5 млн. м³ воды, состоящей из вод отходов обогащения, дождевой воды и воды, откачиваемой из рудника [16]. Использование воды на руднике составляло (при годовой добыче руды примерно 1 млн. т) 2,5-3,5 м³ на тонну руды. Общее потребление воды на обогатительной фабрике на цинковом руднике Виханти (Финляндия) достигало 2,7 м³ на тонну руды или 2,85 млн. м³ в год. В 1983 г. примерно 22% от этого количества было выкачено из рудника, 34% из отстойника. Свежая пресная вода составляла до 44% общего водопотребления. Степень рециркуляции воды колебалась от 60 до 70%.

В общем случае сточные воды, образующиеся в горнорудных районах, включают водоотлив из подземных горных выработок и карьеров; стоки обогатительных фабрик, с отвало- и шламоохранилищ; с площадок кучного выщелачивания, а также различные стоки расположенных непосредственно в горнорудных районах металлургических предприятий. Кроме того, как отмечалось выше, поставка различных веществ в поверхностные водотоки осуществляется также с рудными и ореольными водами, образующими природные вторичные ореолы и потоки рассеяния. Состав поверхностного стока формируется в результате загрязнения подстилающей поверхности (горных пород, почв, снегового покрова) пылегазовыбросами при открытых горных разработках, вентиляционными выбросами рудников, при дефляции отходо- хранилищ и площадок кучного выщелачивания, при потерях рудного вещества при транспортировке руд и пород, выбросами (организованными и неорганизованными) в атмосферу при

процессах обогащения и переработки сырья и использования сопутствующих материалов на обогатительных фабриках и металлургических предприятиях. Определенную роль играет поверхностный сток с территорий, в пределах которых развиты рудогенные геохимические аномалии (вторичные геохимические ореолы).

Сравнительное изучение состава руд, отходов их добычи, обогащения и металлургической переработки показывает, что существенная часть элементов, присутствующая в рудах интенсивно концентрируется в указанных отходах (табл. 9). При этом очень часто в последних более высокие уровни наблюдаются не для основных рудных элементов, а для сопутствующих элементов (элементов-индикаторов). Кроме того, в отходах характерно появление элементов, отличающихся более высокими уровнями содержания, нежели в рудах (т. е. в ходе технологических процессов происходит вторичное обогащение).

Таблица 9. Химические элементы в рудах, отходах обогащения и шлаках [40, 92, 98]

Месторождение	Объект	Порядок значений кларков концентрации элементов				
		>>100	100-30	30-10	10-3	3-1,5
Колчеданно-полиметаллическое	Руда	Bi-Te-Zn-Cd-Pb-As-S-Ag	Se	-	-	-
	Отходы обогащения	Bi-Te-Cd-Ag-As	Pb-Zn	Se-Mn	S	
Полиметаллическое	Руда	Cd-Zn-Ag-Pb	Cu-Bi	Mo	Sn-Co	Y-Ga-Sr
	Отходы обогащения	Ag-As	Pb-Cd-Sb	Cu-Bi-Zn-	Sn	Ba-Co-Nb
	Шлам металлургического завода	Ag-Cd-Zn-Pb	Cu-Mo	Co-Sn-Ni	Mn-Bi	W
Колчеданно-полиметаллическое	Шлам из хвостохранилища	Bi-Pb-Zn-As-Ag-Cd-Sb-Cu	-	Ba-Tl-Mo	Mn-Co	W-Ge

В отходах обогащения ежегодно складываются десятки, сотни и даже тысячи тонн химических элементов (табл. 10). В отвальных шлаках ГМК «Североникель» в среднем содержится 1100 мг/кг Cu, 1100 мг/кг Ni, 400 мг/кг Co; в отвалах комбината «Печенганикель» концентрации Ni составляют 800-1000 мг/кг, Cu – 600-1000 мг/кг [84]. В последнем случае масса отвалов достигает 20 млн. т, т. е. в них аккумулировано по 20 тыс. т Ni и Cu. При выветривании отходов идет активное извлечение из них сульфатов меди и никеля. В районе Салаирского горно-обогатительного комбината в хвостохранилищах накоплено около 30 млн. т отходов, в которых содержания Au, Ag, Pb, Zn, Ba порой превышают таковые в балансовых рудах [6]. В частности, концентрации Ba достигают 27%, Zn - до 1,4%, Pb - до 1%, Ag - до 30 мг/кг [38].

В отношении полиметаллических месторождений имеется значительное количество данных, показывающих, что концентрации химических элементов в породных отходах могут быть чрезвычайно высокими. Особенно это касается отвалов разработок прошлых лет, когда выбирались руды со значительно более высокими концентрациями, нежели в настоящее время. Например, по данным Девиса [100], в отвалах ряда полиметаллических месторождений

США, Англии, некоторых африканских стран содержания Pb достигают сотен и тысяч мг/кг (до 1,5% в Уэльсе), Zn - тысячи мг/кг (до 3%), Cu - сотен и тысяч мг/кг. Отходы, образующиеся при разработках месторождений борато-магнетитовых руд, обогащены As (в среднем 100 мг/кг; годовое поступление составляет 200 т), Cr (в среднем 342 мг/кг; годовое поступление - 684 т), редкими землями (1300 мг/кг; годовое поступление - 2600 т) [67]. Чрезвычайно высокими концентрациями отличаются шлаки горно-металлургических предприятий. Например, по данным, полученных ИМГРЭ, в шлаках Алавердского горно-металлургического комбината (производство меди) фиксировалась следующая ассоциация элементов (в скобках кларк концентрации): Bi (17777), As (5882), Cd (923), Sb (317), Pb (251), Cu (158), Mo (83), Ag (68), Ba (46), Zn (10).

Таблица 10. Химические элементы в рудах и отходах колчеданно-полиметаллического месторождения [67]

Элемент	Рудная масса		Отходы		
	мг/кг	K_C	мг/кг	K_C	P
Висмут	40	4400	30	3300	37
Теллур	1	1000	1	1000	1,2
Цинк	66700	804	3000	36	3700
Кадмий	100	770	30	230	37
Свинец	11900	740	1500	94	1850
Мышьяк	1000	590	200	120	246
Сера	192000	400	1390	3	1712
Серебро	16	230	10	137	12
Селен	2	40	1	20	1,2
Марганец	-	-	10000	10	12360

Примечание. K_C - коэффициент обогащения по отношению к местному фону; P - запасы химических элементов в отходах, т/год.

Как известно, в большинстве случаев в рудах и рудовмещающих породах химические элементы присутствуют в сульфидных формах, которые на дневной поверхности начинают испытывать активное воздействие разнообразных агентов выветривания [66, 68]. При этом миграционная подвижность продуктов выветривания обусловлена, прежде всего, количеством сульфидов и, следовательно, образующейся при их окислении серной кислоты, а также сорбционными, нейтрализующими и осаждающими свойствами вмещающих пород. Показательно, что во многих случаях содержания сульфидов в отходах (особенно в хвостах обогащения) превышают 10-20% при содержании металлов (таких, как Pb, Zn, Cu) в десятки, сотни и даже тысячи раз выше фона. Исследования последних лет показывают, что техногенное воздействие на месторождениях приводит к резкому (в несколько раз) увеличению зоны гипергенеза. Такие явления, например, наблюдались на Красногвардейском медно-колчеданном месторождении на Урале [1] и на сульфидно-касситеритовых месторождениях Комсомольского оловорудного района [59].

Наиболее сильно интенсивность процессов выветривания возрастает в условиях отвалов и хвостохранилищ. Это связано с высокой проницаемостью агентов выветривания и хорошими условиями для удаления растворимых продуктов, не успевающих осадиться на геохимических барьерах. Кроме того, выщелачивание химических элементов в хвостохранилищах интенсифицируется кислотными остатками флотореагентов, поступающих вместе со сбросными водами. Как правило, материал хвостохранилищ представлен преимущественно мелкими и тонкими гранулометрическими фракциями, что, безусловно, определяет его повышенную миграционную способность. Принципиальным является тот факт, что в отвалах и хвостохранилищах активно идут процессы современного минералообразования, направленные на образование различных вторичных минералов, как правило, менее устойчивых в условиях окружающей среды. В отвалах, в ходе процессов новейшего выветривания, так же как и в коренных породах образуется профиль с вертикальной зональностью окислительно-восстановительного типа [65]. Девис [100] приводит данные о формировании поверхностной зоны окисления в погребенной зоне восстановления. При разработке колчеданных месторождений, когда сульфидные руды вступают в непосредственное соприкосновение с большими количествами свободного кислорода, процессы окисления могут протекать настолько интенсивно, что температуры поднимаются до 300°C и даже выше и происходит обильное выделение удушливых газов. Эти бурные процессы подземного окисления пирита в рудниках получили название «подземных колчеданных пожаров» [70]. В этой зоне рудничные воды имеют температуру до 100°C. К тому же окисление пирита и других сульфидов при колчеданных пожарах приводит к образованию серной кислоты, сульфатов, различных летучих продуктов. Все это чрезвычайно способствует интенсификации различных эпигенетических процессов. На Красногвардейском месторождении наблюдалась герметично закрытая горная выработка, стенки которой были покрыты новообразованными хорошо растворимыми минералами: мелантеритом, пизанитом, глоккеритом, самородной серой и др. Расчеты показали, что в результате химического разубоживания за год выносятся 170 т серы халькопирита и более 500 т серы пирита; за период эксплуатации одного из медно-колчеданных месторождений с 1935 г. по 1983 г. рудничными водами вынесено более 50 тыс. т Cu, причем 2/5 этого количества поступило в окружающую среду [1]. В отвалах, образующихся при разработке оловянно-полиметаллических месторождений, в верхнем слое формируется зона выщелачивания (мощностью до 30-40 м), обедненная рудными элементами и железом [57]. Верхние горизонты отвальных пород характеризуются также низкими значениями pH водной вытяжки (3,5-4,5). В нижних горизонтах отмечается обогащение гидроксидами железа и марганца, иногда формируется зона скопления гипса. В почвах, погребенных под отвалами, происходит сильное подкисление всей толщи профиля (pH 3,5-4,0), разрушаются почвенные коллоиды, нарушается

почвенный поглощающий комплекс, активизируется миграционная способность органического вещества, происходит вынос кальция и магния из гумусового горизонта. Почвы обогащаются рудными компонентами, глубина проникновения которых для различных элементов неодинакова. Все это свидетельствует о подвижности химических элементов в отвалах, которые практически никогда не изолированы от водных систем, что определяет их поступление в водотоки.

В сернокислых ландшафтах в ходе миграции химических элементов от отвалов к местному бассейну стока осуществляется определенная геохимическая дифференциация (табл. 11). В результате создается определенная зональность, что выражается в существовании: 1) области преимущественного осаждения Fe и связанных с ним аниогенных элементов (P, As), а также Pb на щелочно-кислородно-сорбционном барьере у выходов фильтрационных вод на поверхность; 2) области аккумуляции Zn, Cu, Cd, Pb на органо-сорбционных барьерах торфяно-перегнойно-глеевых пойменных почв [28]. Тем не менее в речных водах ниже отвалов (впадения фильтрационных вод) фиксируются повышенные (на 1-4 порядка) концентрации Zn, Cd, Cu, Fe, As, P, сульфатов, магния и др. Самые протяженные потоки (до $n \times 10$ км) образуют Zn и Cd.

Таблица 11. Вынос химических элементов из отвалов отработанного полиметаллического месторождения, юг дальнего Востока

Место	pH	SO ₄ ²⁻	P	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Отвалы, мг/кг	-	-	12000	180000	1300	29000	4000	140	12000
Фильтрационные воды, мг/л	2,6-3,9	5000	0,2	100	6	800		2	0,6
Латеритоподобный панцирь, подножье отвалов, мг/кг	-	-	20000	720000	Слабое накопление	Слабое накопление	3600	Слабое накопление	2200
Пойма малой реки, торфяно-перегнойная почва, мг/кг	-	-	--	-	12000	14000 0	-	18000	2550
Речные воды	Концентрации повышены на 1-4 порядка								

Примечание. Таблица составлена по данным [28]; приведены максимальные значения; отвалы образованы бескарбонатными вскрышными породами и забалансовыми рудами, включают пирротин, арсенопирит, сфалерит и др.; прочерк - данные отсутствуют.

Воды, образующиеся на отвало- и хвостохранилищах, сбрасываются непосредственно в поверхностные водотоки или инфильтруются в ложе и борта мест захоронения, в конечном счете также разгружаясь в поверхностные водные объекты. Существенная роль в поставке

поллютантов принадлежит рудничные воды. Например, если в горных районах Северной Осетии естественным фоном являются относительно маломинерализованные преимущественно гидрокарбонатные кальциевые воды, то сливные воды полиметаллических рудников отличаются высокой минерализацией (они, в основном, солоноватые) и сульфатно-кальциевым (или натриевым) составом (табл. 12). Стоки водоотлива рудников и карьеров характеризуются специфическим общим химическим составом (табл. 13) и обогащены многими химическими элементами, концентрации которых многократно превышают фоновые и кларковые уровни (табл. 14, 15). В шахтных водах Октябрьского и Сибайского медно-колчеданных месторождений концентрации ртути достигали 13 и 20 мкг/л соответственно [48].

Таблица 12. Химический состав шахтных вод рудников Сев. Осетии, мг/л [61]

Рудник	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сухой остаток
Буронский	166,6	530,2	10,3	13,6	230,0	24,4	937,0
Холст	136,4	682,5	3,1	23,4	231,6	49,0	1131,0
Садонский	318,7	584,9	13,7	195,6	154,5	30,3	1105,0
р. Цейдон (фон)	61,0	27,6	2,1	12,9	16,9	2,9	121,0

Таблица 13. Химический состав вод в районе Юрьевского золотосеребряного месторождения, мг/л [91]

Объект	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	M
Штольня	266,0	332,0	1,0	3,7	1,9	156,3	45,6	0,8	807,3
Фон	22,0	1,7	1,0	2,6	0,4	5,4	1,1	0,1	34,7

Таблица 14. Химические элементы в сливных рудничных водах, мг/л [104]

Месторождения	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Золоторудные, ЮАР	4-206	3-550	1,92-15,9	0,06-5,4	1,15-26	до 0,052	до 0,29
Воды зоны гипергенеза (Шварцев, 1978)	0,0494	0,547	0,00331	0,00558	0,034	0,00033	0,000221

Таблица 15. Среднее содержание химических компонентов в водах сульфидных шахт Финляндии (Нуурра, 1981, 1983; цит. по [16])

Шахта	Глубина, м	pH	мг/л		мкг/л			
			SO ₄ ²⁻	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
Отоку	10	6,9	110	0,8	400	3	170	1
	320	4,1	4400	220	2300	20	3100	1
Пухасалми	150	3,1	3200	90	600	100	230000	60
	210	3,0	5000	260	500	100000	1100000	35
	500	7,2	630	0,2	1	2500	2400	16

В шахтных и рудничных водах уральских медно-колчеданных месторождений содержится ряд микроэлементов (TR, Cd, Sb, W и др.), концентрации которых часто очень высоки или заметны настолько, что приближаются к концентрациям в соответствующем сырье [75-77]. Так, среднегодовые концентрации редкоземельных металлов, несмотря на вариации от года к году, постоянно превышают рекомендуемые условные минимально промышленные со-

держания. Исследования состава всех видов водопрооявления на Филизчанском месторождении (Азербайджан) - родников, ручьев, канав, штолен, самоизливающихся скважин – показали, что в водах постоянно присутствуют в высоких концентрациях Pb, Zn, Co, Ag, Cu. В отдельных случаях встречались повышенные концентрации Sb, In, W. Перечисленные элементы появляются при разрушении рудных минералов - пирита, халькопирита, сфалерита, галенита и др. Al, Ti, Mn, Cr, Ni, V и ряд других элементов вымываются из рудовмещающих пород кислыми сульфатными водами (Алиев, Мамедов, 1990). Воды р. Тырнауз и особенно ее правых притоков, дренирующих Тырнаузское вольфрамово-молибденовое скарново-шеелитовое месторождение, были сильно обогащены молибденом [13, 87]. В верховьях последних зафиксированы концентрации этого металла, варьирующиеся от 0,325 до 1,8 мг/л; достаточно высокими они оставались и в устьях притоков (0,5-2,1 мг/л). В устье р. Тырнауз (выше места сброса фабричных вод) содержание Mo достигало примерно 0,5 мг/л. Наиболее высокие содержания его были обнаружены в пробах воды, отобранных в горных выработках (до 10-15 мг/л). Твердая часть различных стоков и сливов (т. е. взвесь) характеризуется присутствием очень высоких концентраций многих химических элементов (табл. 16).

Таблица 16. Геохимические ассоциации элементов в твердой части стоков вольфрам-молибденового горно-обогатительного комбината [67]

Источник (откуда – куда)	Порядок значений кларков концентрации элементов			
	10000-1000	1000-100	100-10	10-1
С обогатительной фабрики в хвостохранилище	Bi	Sb	Sn-W-Mo	Ge-Pb-Zn-Mn-Ag-Cu-Co-Nb-Cr-V-P
Из хвостохранилища в водоток	Bi	W-Sb-Sn	Mo-Zn	Ge-Mn-Pb-Cu-Nb-V-Sn-B-Zn-Cu-Cr
Из водотока в главную реку	Bi	Sb	W-Mo	V-Ag-P

С эколого-геохимических позиций особую значимость имеет отвод кислых рудничных вод. Хорошо известно, что даже в результате естественного выщелачивания сульфидных руд значения pH указанных вод могут снижаться до 3-4, что интенсифицирует процессы растворения и выщелачивания многих химических элементов, резко увеличивая их миграционную способность и, соответственно, уровни содержания в поверхностных водах. Например, на гидротермальных плутогенных месторождениях сульфидного подкласса в связи с интенсивными процессами окисления сульфидов воды характеризуются значениям pH 3-3,5 и повышенными значениями Eh (до 600 мВ) [33]. Гидрогеохимические поля таких месторождения выделяются высокой контрастностью содержаний многих халькофильных элементов. Активная добыча руд еще более увеличивает интенсивность выщелачивания и способствует снижению pH природных вод до 1,4-3. Поступление кислых рудничных стоков в поверхностные водотоки вызывает преобразование речных экосистем на значительных расстояниях. Практиче-

ски в любом климате в районах добычи и переработки сульфидных руд формируются сернокислые ландшафты [54, 55].

Одним из наиболее известных бассейнов дренирования кислых вод является район Спринг-Крик, расположенный в 250 км от г. Сан-Франциско (США) и занимающий площадь около 600 км² [112]. Здесь имеются многочисленные проявления Cu-Zn сульфидного оруденения, в результате выщелачивания которого значения pH вод снижаются до 5-7; эти воды выносят часть рудных компонентов, отлагая их в долине в виде залежей сульфатных руд. Их разработка была начата в 1895-1896 гг. открытым способом и достигла максимума (до 1000 т руды в день) в 1904 г. Позже добыча велась в 1930-1945 гг. Все это способствовало интенсивному выщелачиванию оставшихся залежей сульфатных руд и отходов их плавки, что привело к загрязнению токсичными элементами окружающей местности в радиусе 15-20 км. Опробование, проведенное в 1958-1960 гг., показало, что значения pH поверхностных вод снизились здесь до 3,5-1,4. Это способствовало активному выносу металлов в поверхностные водотоки. Аналогичные процессы были отмечены в районе рудника Пен-Майн, где поверхностные воды характеризуются значениями pH 4,4-1,7. В горнорудном районе Пирамид (оз. Пирамид, шт. Невада), отличающегося резко аридным климатом, естественным фоном являются слабощелочные воды (pH 7,7-8,5), однако в районе действующих рудников они стали кислыми (pH в среднем 2,3). В Фостерс-Кэмпе, где в 1920-1930 гг. добывались Au-Ag и Cu-Mo руды, отмечены аномально кислые воды с pH 0,1. В одном из старых горнорудных районов Швеции, недалеко от Стокгольма, где в 1850-1902 гг. велась добыча меди, оставшиеся отвалы являются источниками поступления в водотоки кислых вод, обогащенных металлами (Al, Fe, Cd, Zn и др.); pH вод колеблется в пределах 3,7-6,6 [106]. Процессы активного и непрерывного сернокислотного выветривания, обусловленного разработкой медно-колчеданных залежей Среднего Урала, привели к активизации миграции чрезвычайно разнообразного по составу комплекса тяжелых и редких металлов [77]. В кислых рудничных водах разрабатываемых медно-колчеданных месторождений Урала концентрации кадмия находились в пределах 0,025-177,4 мг/л [74]. При этом в слабокислых сульфатных рудничных водах он преимущественно присутствовал в виде двухвалентного катиона (до 60-88%), доля нейтрального сульфатного комплекса составляла 9,2-31%. В одном из кислых рудничных ручьев, дренирующих старый горнорудный район, расположенный на о. Англеи (Северный Уэльс), где до конца XIX в. добывали медную руду, уровни содержания ряда тяжелых металлов достигали колоссальных значений [103]. Даже несмотря на значительное разбавление «фоновыми» притоками, в водах указанного ручья содержалось (по сравнению с местным фоном) примерно в 100 раз больше Zn, Cu и Mn. Так, в верховьях ручья и в его устье концентрации Fe в воде соответственно достигали 110000 и 11000 мкг/л; Cu - 10600 и 2850; Mn - 7750 и 2150; Zn - 21700 и 5550 мкг/л. В

водах эстуария, принимающего сток ручья, также фиксировались высокие концентрации указанных металлов. На одном из крупнейших в мире меднорудном месторождении Дэсин в Китае, разрабатываемом более 20 лет, среднесуточная добыча руды в ближайшее время превысит 100 тыс. т, что приведет к образованию около 14,4 млн. т кислых рудничных стоков с pH до 2,4-2,7 и содержаниями Cu до 80-140 мг/л и Fe до 2000-3000 мг/л (Лю Худун, 1990).

Сернокислотный процесс может еще более активизироваться под воздействием пылегазовыбросов заводов по выплавке металлов, содержащих металлонесущие аэрозоли и сернистый газ [28]. В процессе аэрального переноса осуществляется окисление сернистого газа до сульфатов и соответствующее подкисление атмосферной влаги, способствующее растворению указанных аэрозолей. Дождевая и особенно туманная влага в районах влияния эмиссий представляют собой в разной степени разбавленные растворы серной кислоты, которые активизируют процессы сернокислотного гипергенеза, особенно на отвалах, хвостохранилищах и загрязненных почвах. В условиях техногенеза интенсифицируются процессы внутрипочвенного выветривания, причем воздействие кислотных дождей оказывается более сильным, чем природные процессы сернокислотного выветривания, обусловленные обычным литогенезом [3, 29].

Сточные воды обогатительных фабрик и металлургических предприятий, кроме рудных и сопутствующих химических элементов, обычно содержат нефтепродукты и разнообразные агенты флотационного обогащения (собиратели, вспениватели, депрессоры, активаторы, регуляторы), среди которых известь, сода кальцинированная, сернистый натрий, различные органические и неорганические кислоты, цианиды и многие другие соединения (табл. 17-19). Расход флотореагентов может составлять сотни-тысячи грамм на 1 т перерабатываемой руды. Необходимо отметить, что в процессе очистки стоков нередко образуется ряд опасных соединений и возрастают содержания отдельных компонентов. Так, для разрушения цианидов применяется метод окисления щелочным хлорированием. Это может приводить к образованию очень токсичного промежуточного продукта - хлорциана, загрязнению сточных вод хлором, неполному окислению комплексных цианидов Fe^{3+} , которые остаются в виде ионов $Fe(CN)_6^{3-}$, создавая потенциальную угрозу загрязнения окружающей среды цианидами [18].

Важными источниками загрязнения поверхностного (талого и дождевого) стока являются пылегазовые выбросы объектов горнодобывающей промышленности, осаждение которых приводит к формированию в снеговом покрове и почвах техногенных геохимических аномалий. При разработке месторождений в атмосферу могут поступать различные газообразные продукты (метан, оксид углерода, оксиды азота, соединения серы), которые выделяются из горных пород, полезных ископаемых или образуются в ходе технологических процессов (при взрывах, бурении, работе автотранспорта и т. п.). Тем не менее основной объем выбросов при

добыче и обогащении руд, а также при транспортировке и выгрузки руды и концентратов приходится на пыль. Объемы рассеиваемых в воздухе пылевых масс даже на горно-обогатительном комбинате средней производительности составляют сотни-тысяч тонн в год. Например, одновременно при массовых взрывах на крупных карьерах используется 200-1000 т взрывчатого вещества [16, 47]. Объем пылевого облака достигает 20-25 млн. м³. В воздух на высоту 150-250 м поднимается до 150-300 т пыли.

Таблица 17. Химический состав сточных вод меднорудных обогатительных фабрик, мг/л [80]

Компонент	Сливы со сгустителей			Общий сток
	медного	цинкового	пиритного	
Грубодисперсные примеси	124	34	55970	44250
Сухой остаток	1100	2300	2180	1950
Кальций	288	1042	780	684
Хлориды	23	23	85	24
Сульфаты	403	132	268	264
Цианиды общие	3,2	0,7	0,16	0,73
Железо общее	0,3	0,3	0,3	0,35
Медь	2,2	0,1	0,1	0,43
Цинк	1,1	2,6	2,1	2,3
Пиридин	0,02	0,03	-	0,02
Ксантогенаты	2,6	0,3	1,5	1,6
Расход сточных вод, м ³ /сут	7350	500	19400	32000

Таблица 18. Химический состав сточных вод свинцово-цинковых фабрик, мг/л [80]

Компонент	Сливы со сгустителей				Хвосты флотации	Общий сток
	цинкового	свинцового	медного	пиритного		
Грубые примеси	171	151	184	64300	160000-300000	150000-250000
Сухой остаток	747	668	2030	695	754	830
Хлориды	15,6	14,3	-	33,3	32,8	29,1
Сульфаты	168	169	372	440	250	223
Цианиды:						
свободные	1,8	0,9	2,6	0	2,4	5,6
в комплексе	1,6	4,6	235	2,9	5,9	4,4
Cu в комплексе с цианидами	1,2	3,75	192	2,4	4,8	4,7
Zn в комплексе с цианидами	0,5	-	-	0,5	-	8,8
Свинец	1,5	0,43	0,14	0,37	2,7	0,8
Цинк	1,03	0,97	2,25	-	10,1	6,5
Сосновое масло	17,2	25,7	24	-	8	25,2
Фенолы	2,4	2,3	10,4	3,4	4,7	16
Ксантогенаты	0,6	0,3	1,9	0,14	0,48	2,4
Дитиофосфаты	2	0,5	2,5	0,05	1,6	2,3
Расход сточных вод, м ³ /сут	60-2300	160-1980	43-420	200-470	300-6900	6620-3670

Как правило, в процессах измельчения участвует вся масса руд (дробление при обогащении) или руды и вмещающие породы (горно-взрывные работы), поэтому в первом при-

ближении состав образующейся пыли должен отвечать их составу. В то же время избирательное измельчение тех или иных минералов может изменять соотношение между химическими элементами и их соединениями в пыли по сравнению с исходными породами. В частности, изучение состава пылевых выбросов молибдено-вольфрамового комбината (основными компонентами руд являются W, Mo, Bi, Cu), образующихся на различных стадиях технологического процесса, установило широкую ассоциацию концентрирующихся в промышленной пыли химических элементов (табл. 20). Важнейшей особенностью геохимических ассоциаций в пыли является наиболее интенсивное концентрирование в ней Bi, Sb, As, W, Mo, Sn, в меньшей степени Pb, Zn, Ag. Показательно, что большинство элементов, являющихся ведущими в геохимических ассоциациях, сопутствуют основному оруденению. Наиболее резко концентрируются элементы в пыли, образующейся при дроблении руды, на метателерах с грохотов на мельницы и при сушке и загрузке концентратов, т. е. на начальных и конечных стадиях производственного цикла. Специфично появление высоких концентраций ртути в пылевых выбросах шахты, а также Cd и In при сушке и загрузке медно-висмутового концентрата. По данным X. Аннегарна и др. [99.], в составе пыли, образующейся при бурении шпуров и при взрывных работах на золотых рудниках ЮАР, отмечены очень высокие концентрации Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, Cr, Ti и ряда других элементов. В районах добычи урановых руд фиксируется загрязнение воздуха и прилегающих территорий радиоактивной пылью, возникновение которой связывается с распылением руды при ее подъеме на поверхность и дефляцией отработанных пород [109]. Следует отметить, что атмосфера многих рудников по добыче цветных и редких металлов отличается повышенной радиоактивностью [90].

Таблица 19. Состав сточных вод рудообогатительных фабрик, мг/л (общий сток до очистки) [79]

Показатель, компонент	Редкометалльные	Вольфрамо-молибденовые	Сурьмяно-ртутные	Оловянные	Медные
рН	6,5-8	9-11	8-8,3	5,9-10	11-11,8
Окисляемость	5-200	68-544	85-100	25-180	52-344
Сухой остаток	600-1300	4400-6800	400-900	190-580	1600-2647
Сульфаты	80	93-1000	135-400	3-380	1538-1700
Хлориды	70	21-100	40-60	30-50	144
Фенол	0,003	0,05	0,1-0,3	-	-
Нефтепродукты	4	29	11-50	1-5	-
Ксантогенаты	0,2	0,2-0,5	2,5	1,3	0-2,4
Медь	-	0,6	-	-	0,7
Свинец	-	0,7-1,4	-	-	0,5
Цинк	-	0,4-320	-	-	8,3
Цианиды	-	0,4	-	-	0
Марганец	-	64,5	-	-	0
Бериллий	-	-	-	-	-
Фтор	-	3,4-23	-	-	2,3

Таблица 20. Геохимические ассоциации элементов в пылевых молибден-вольфрамовых росах горнообогатительного комбината [67, 68]

Источник	Порядок значений кларков концентрации элементов				
	>10000	10000-1000	1000-100	100-10	10-1
Карьер	Bi	-	As-Sb-Mo-Sn	W-Pb-Zn-Cu	B-Ag-Mn-V-Co-Ba-Ga
Шахта	Bi	Hg	W-Mo-Sb-As	Sn-Ag-Pb	Zn-Cu-Mn-B
Обогатительная фабрика: дробление грохочение метатели с грохотов на мельницы	Bi	Sb	W-Pb-Mo	Sn-Ag	Zn-Cu-Mn-B
	-	Bi	W-Mo-Sb	Sn-Pb	Ge-Zn-Mn-Cu-Ag-V
	Bi	-	Pb-Sb-W-Mo	Sn-Sc	Ag-Mn-Cu-V
Сушка и загрузка концентрата: молибденового W-промпродукт Cu-Bi концентрат	Bi	As	Sb-W-Mo	Ag-Sn-Pb	Cu
	-	Sb-Bi	W-Pb-Mo	Ag-Zn	Ge-Sn
	Bi	As-Cd-Ag	Sn-W-Pb-Zn-Mo-Cu	In	Co-Ni-Nb-Cr-V-Mn-P

Большие объемы обогащенных химическими элементами пылевых выбросов обуславливают существенную нагрузку на окружающую среду и формирование техногенных геохимических аномалий в почвах и снеговом покрове. Анализ имеющихся данных показывает, что в зонах воздействия источников загрязнения в депонирующих средах (почвах и снеге) всегда образуются геохимические аномалии с четко выраженным градиентом концентрации от центра к периферии. Центральные части аномалий приурочены к источнику выбросов. В их пределах уровни содержания элементов в десятки и сотни раз превышают фоновые параметры. Размеры этих частей аномалий обычно не превышают первые квадратные километры [67]. Пространственная структура (морфология) геохимических аномалий (зон загрязнения), формирующихся под влиянием выбросов в атмосферу, относительно проста. Общий контур зоны воздействия определяется гидрометеорологической ситуацией и особенно направлением, скоростью и частотой ветров. Зоны наиболее интенсивного воздействия связаны преимущественно со штилевыми условиями и периодами невысоких скоростей ветра. Это и обуславливает центральное положение источника выбросов на площади выявленных геохимических аномалий. В горных условиях морфология аномалий во многом зависит от рельефа. Как правило, участки с наиболее контрастным накоплением химических элементов локализованы преимущественно в пределах горно-долинных ландшафтов, в которых расположены источники выбросов. Обычно облако интенсивных выпадений практически полностью локализуется в долине, на склоне которой расположен карьер, и не выходит, по сути дела, за водораздел [67]. Оно целиком покрывает поселок, расположенный в 1-2 км от карьера, где уровни выпадения пыли и рудообразующих металлов примерно в 50 раз выше фона. В продольном профиле вдоль долины зона

аномальных выпадений распространена значительно дальше, и фоновые концентрации металлов наблюдаются лишь в 10 км от карьера. Поскольку мощность пылевого выброса карьера чрезвычайно велика, то в распределении выпадений влияние обогатительной фабрики и отвалов, расположенных соответственно в 1,5 и 3 км от карьера, почти не сказалось. Тем не менее все эти объекты четко фиксировались по результатам геохимического опробования верхнего горизонта почв.

В исключительных случаях дальность и масштабы воздействия, фиксируемые по химическим изменениям в почвах, могут быть очень значительны. Так, исследования влияния железо-добывающих предприятий и их отходов на почвенный покров, показали, что Cu, Co, Ni, Pb, Zn, Mn и Cr, присутствующие в железных рудах, проникали в почву до глубины 120 см на территории, удаленной на 30 км от источника воздействия [111]. Площадь атмогеохимических аномалий в районе горнопромышленных комбинатов Южного Приморья превышает 40 км² [32]. В зонах максимальных выпадений на расстоянии до 2 км от источника выбросов выпадает: Pb в 1000-5000 раз, Zn в 100-200, Cu и Ag в 50-100 раз больше фоновой нормы. Содержания тяжелых металлов в верхнем горизонте почв увеличены в десятки раз выше фона. В окрестностях Салаирского горно-обогатительного комбината на площади 45 км² выявлено загрязнение почв свинцом, уровни содержания которого превышают в 1-10 раз ПДК, причем треть территории отличается концентрациями этого металла с превышением ПДК в 10-30 раз. В отдельных точках уровни свинца достигают значений в 30-70 ПДК [38]. Исследования Ю.Н. Семенова [73], выполненные в районе хвостохранилища Садонского комбината показали, что запасы Pb и Zn в верхнем 20 см слое почв на площади 0,35 км² составляет примерно 45 т и 120 т соответственно. Основными формами нахождения металлов в почвах являются подвижные-карбонатные и гидроксильные соединения.

Таким образом, в зонах влияния промышленных выбросов в депонирующих средах формируются интенсивные и комплексные по составу техногенные геохимические аномалии (пространственно отражающие устойчивые зоны загрязнения), являющиеся источниками поступления поллютантов в поверхностный (склоновый) сток, которые в конечном счете попадают в водотоки.

Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях рек горнорудных районов

Рассмотрим особенности техногенных геохимических аномалий, свойственных донным отложениям рек горнорудных районов, на примере районов полиметаллических месторожде-

ний Северной Осетии и известного молибден-вольфрамового месторождения Тырныауз [92, 93, 95, 98].

Материалы по Северной Осетии показывают, что наблюдается направленное увеличение интенсивности и масштабов техногенного загрязнения в ряду воздействия следующих источников: «геологическая разведка - добыча - обогащение - переработка полиметаллических руд» (табл. 21). Особенно существенно в указанном ряду воздействия увеличивается протяженность техногенных геохимических аномалий (техногенных потоков рассеяния). Так, если прослеженная протяженность природных геохимических аномалий (рудогенных потоков рассеяния) составляет, как правило, первые сотни метров, то длина техногенных потоков рассеяния достигает несколько десятков километров. Одновременно резко меняются соотношения между концентрациями химических элементов, характерные для рудогенных аномалий. Показательно, что степень концентрирования многих рудных элементов-примесей в техногенных аномалиях выше, нежели в их природных аналогах. В свою очередь, уровни содержания некоторых химических элементов в техногенных образованиях (шламах, техногенно измененных речных отложениях) не уступает их валовым концентрациям в полиметаллических рудах. Максимальное техногенное воздействие установлено для водотоков, принимающих сточные воды металлургических заводов (табл. 22).

Таблица 21. Геохимические ассоциации в донных отложениях горных рек (обобщенные данные по Северной Осетии) [95]

Источник воздействия (период)	Порядок значений K_C химических элементов					Длина, км	Z_C
	>100	100-30	30-10	10-3	3-1,5		
Природные	-	-	-	-	Pb-Zn-Bi-Sn-Y	0,1-0,6	10
Разведочные выработки	-	-	-	Pb	Zn-Cu-Ag-Bi	1-3	18
Горнорудные (20 лет)	-	-	Zn-Ag	Pb	Cu-Nb-Ga-Y-As	5*	65
То же (35 лет)	-	-	Zn	Pb-Ag	Ba-Nb-Cu-Y-Sr-Bi-As	6**	52
То же (150 лет)	-	Pb	Zn	Ag-Cu	Ga-Ni-Co-Sn-Bi-Nb-As	> 6	130
Горнообогапительные (15 лет)	-	-	Zn	Pb-As	Y-Cu-Sc-Ag-Co-Ba-Sb-Bi	> 40	60
То же (90 лет)	-	Zn-Ag-Pb	Cu	Ba-Bi-Cd-As	Mn-Mo-Sn-Co-Zr-Nb-Hg-Sb	> 60	295
Материал из хвостохранилищ	Ag	Pb-Cd	Ba-Zn-Cu-As	Bi-Mo-Sb	Sn-Co-Nb	-	800
Полиметаллические руды	Cd-Zn-Ag-Pb	Cu-Bi	Mo	Sn-Co	Y-Ga-Sr	-	7500
Шламы завода Электроцинк	Ag-Cd-Zn-Pb	Cu-Mo	Co-Sn-Ni	Mn-Bi	W	-	6500

* Прослеживается в водотоках 1-го порядка до устья; ** фиксируется в водотоке следующего порядка; Z_C - здесь и далее суммарный показатель загрязнения.

В общем случае интенсивность накопления химических элементов в донных отложениях горных рек в зонах влияния горнорудных и горно-обогатительных предприятий в существенной мере определяется продолжительностью периода их функционирования и, естественно, объемами добываемых и перерабатываемых (на обогатительных фабриках) полиметаллических руд. Как правило, при переходе техногенного потока рассеяния из одного водотока в водоток более крупного порядка за счет разбавления природным материалом уровень концентрации химических элементов снижается. Значения суммарного показателя загрязнения Z_C для донных отложений свидетельствуют о чрезвычайно высоком уровне техногенного загрязнения изученных рек (Терек и его притоки - Камбилеевка, Ардон, Фиагдон) на значительном их протяжении.

Таблица. 22. Геохимические ассоциации в донных отложениях Камбилеевки и Собачей балка (г. Владикавказ, Северная Осетия) [95]

Участок	Длина, характеристика	Порядок значений K_C химических элементов					Z_C
		> 100	100-30	30-10	10-3	3-1,5	
Камбилеевка, верховья	32,5 км; местный фон	-	-	-	-	Pb-Zn	2
Собачья балка	Сток заводов Электроцинк, Победит и др.	Hg-Ag-Cd-Zn-W-Pb	Mo-Sn-Bi-In	As-Co	Nb-Sb	Ga-Ni-Mn-Sr	3600
Камбилеевка, ниже Собачьей балки	70,5 км; зона транзита и осадконакопления	Hg	Zn	Cd-W-Hg	Pb-Ag-Cu-Mo-As	Nb-Sn-Bi	810
Камбилеевка, устье	Место впадения в Терек	Hg	-	Cd-Zn	W-Pb	Nb-Ag-Cu-Mo	450
Шламы завода Электроцинк		Ag-Cd-Zn-Pb	Cu-Mo	Co-Sn-Ni	Mn-Bi	W	6500

Примечание. Стоки завода Электроцинк, сброс которых осуществляется с 1958 г., составляют около 50% всех сточных вод, поступающих в Собачью балку.

На Тарныаузском молибден-вольфрамовом горно-обогатительном комбинате осуществляется добыча и обогащение более специализированных по качественному составу руд. Здесь в пределах фоновых участков в русловом аллювии кларки концентрации химических элементов невелики (табл. 23). В геохимическую ассоциацию входят химические элементы, отражающие геохимическую специализацию горных пород (граниты и андезиты), слагающих водосборные территории. В зоне влияния горного производства в донных отложениях водотоков наблюдаются намного более интенсивные и более разнообразные по качественному составу геохимические аномалии. Особенно высок уровень накопления элементов в русловых отложениях на участке реки ниже поступления стоков из хвостохранилища. Ведущими элементами

геохимических ассоциаций в донных отложениях являются главные металлы руд – W и Mo, в зоне влияния добычных работ значимы также Sn, Pb, V, Ga.

Таблица 23. Геохимические ассоциации в речных отложениях бассейна Баксана [95]

Место	Порядок значений кларков концентрации				
	>100	100-10	10-5	5-3	3-1
Верховья Баксана	-	-	-	-	Pb-Ga-V-Sn-Mo-W-B
Баксан, ниже добычи	-	W	-	Sn-Pb	V-Ga-Mo-Ag-Cu-B-Zn-La-Zr
Баксан в черте г. Тырнауза	-	W-Mo	Sn	Pb	V-Ga-Cu-Ag-Zn-B-La-Zr-Co
Баксан, участок город-хвостохранилище	W	Mo	-	Sn	Pb-V-Ag-Ga-Zr-Zn-B-La
Баксан, 30 км ниже хвостохранилища	-	W	Mo	Sn	Pb-V-Ga-B-Ag-Zr
Притоки вне зоны техногенеза	-	-	-	-	Pb-B-V-Sn-Ga-Mo

Примечание. Распределение As, Bi, Sb и Hg не изучалось.

Таким образом, в горнорудных районах в донных отложениях водотоков фиксируются интенсивные, комплексные по составу и протяженные по руслу техногенные геохимические аномалии. Количественные соотношения между химическими элементами в техногенных геохимических ассоциациях совершенно иные, чем в природных (рудогенных). Очень часто степень концентрирования сопутствующих химических элементов (элементов-примесей) в донных отложениях техногенно загрязненных рек выше, нежели главных компонентов добываемых и перерабатываемых руд. Уровни содержания многих химических элементов в промышленных шламах и донных отложениях рек интенсивно освоенных горнорудных районов не уступают их концентрациям в рудах. Масштабы загрязнения существенно увеличиваются в следующем ряду источников воздействия: «геологоразведочные работы - добыча руд - их обогащение - переработка руд». Элементный состав техногенных геохимических ассоциаций и значения суммарного показателя Z_c свидетельствуют о чрезвычайно высоком уровне техногенного загрязнения рек горнопромышленных районов.

Заключение

Масштабы техногенного воздействия на водные системы в горнорудных районах настолько велики, что всецело определяют их геохимические особенности. В потенциале любое, особенно рудное, месторождение представляет собой комплексный источник загрязнения окружающей среды, что связано с присутствием повышенных концентраций широкой ассоциа-

ции химических элементов в добываемых и перерабатываемых рудах и в отходах производства, составляющих до 98% извлекаемой горной массы.

Основными первичными источниками загрязняющих веществ являются руды и первичные ореолы, причем пространственные размеры последних и количество (масса) заключенных в них химических элементов в большинстве случаев превышают параметры рудных тел, вокруг которых они образуются. В освоенных районах главным фактором преобразования природной среды являются техногенные процессы, проявляющиеся на стадиях поисков и разведки и интенсифицирующиеся при эксплуатации месторождений. Для техногенных миграционных цепей, где распространение поллютантов происходит при образовании отходов, стоков и выбросов, интенсивность загрязнения (степень экологической опасности) во многом определяется типом месторождения, его минералого-геохимическими особенностями, связана с принятой системой добычи, обогащения и переработки минерального сырья и во многом обусловлена объемами и составом извлекаемых горных пород и руд, качеством очистки сточных вод, промышленных выбросов, способами обработки и особенностями хранения твердых отходов, а также зависит от характеристик местных ландшафтов. На ранних стадиях освоения месторождения состав химического загрязнения в целом соответствует геохимической специализации территории. По мере увеличения степени освоения месторождения интенсивность техногенного воздействия увеличивается, а качественный состав загрязнения может резко меняться. Наиболее экологически опасными являются промышленно-генетические типы месторождений, разработка которых приводит к резкому увеличению мощности зоны гипергенеза и изменению условий миграции поллютантов.

По своим размерам, комплексности состава и интенсивности концентрирования химических элементов техногенные аномалии, фиксируемые в водах, взвесьях и донных отложениях водотоков, в подавляющем большинстве случаев превосходят природные аналоги. С эколого-геохимических позиций принципиальными являются следующие факты. Прежде всего, несмотря на то, что в горнорудных районах качественный состав техногенных источников в принципе адекватен природным, количественные соотношения между химическими элементами в техногенных аномалиях принципиально иные, чем в природных. Как правило, уровень загрязнения сопутствующими элементами (элементами-примесями) заметно выше, чем таковой главными компонентами добываемых руд. Для техногенных аномалий, фиксируемых донными отложениями рек, характерно почти повсеместное присутствие в высоких концентрациях многих редких элементов. Интенсивность, комплексность и масштабы загрязнения заметно (часто многократно) увеличиваются в ряду воздействия «разведка-добыча-обогащение-переработка руд». В образовании техногенных геохимических аномалий существенную роль играют пылевые выбросы в атмосферу, отвалы горных пород и хвостохранили-

ща, определяющие состав поверхностного (талого и дождевого) стока с территории горнорудных районов. Формирующиеся в реках горнорудных районов зоны техногенного загрязнения отличаются чрезвычайно высокой устойчивостью; их негативное воздействие сказывается многие десятки лет после прекращения функционирования предприятий.

Литература

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9..
- 10.
- 11.
12. Вернадский В.И. Геохимия марганца в связи с учением о полезных ископаемых // Тр. Конф. по генезису руд железа, марганца и алюминия. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1937, с. 229-246.
- 13.
- 14.
- 15..
- 16.
- 17.
- 18.
- 19.
- 20.
- 21.
- 22..
- 23.
- 24.
- 25.
- 26.
- 27.
- 28.

- 29.
- 30.
- 31.
- 32.
- 33.
- 34.
- 35.
- 36.

37. Колотов Б.А., Янин Е.П. Глобальные, региональные и локальные тенденции изменения природных вод под влиянием техногенеза // CD-ROM: Всерос. съезд геологов и науч.-прак. Геологическая конференция «Геологическая служба и минерально-сырьевая база России на пороге XXI века. Тез. докл. Кн. 4. - СПб.: ВСЕГЕИ, 2000, с. 329-330

38. Колотов Б.А., Янин Е.П., Калугин Д.Е. Проблемы геоэкологии рудных районов в зонах взаимодействия литосферы и гидросферы // CD-ROM: Всерос. съезд геологов и науч.-прак. Геологическая конференция «Геологическая служба и минерально-сырьевая база России на пороге XXI века. Тез. докл. Кн. 4. - СПб.: ВСЕГЕИ, 2000, с. 330-331.

- 39.
- 40.
- 41.

42. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по вторичным ореолам рассеяния. - М.: ИМГРЭ, 1993. - 191 с.

43. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по потокам рассеяния. - М.: ИМГРЭ, 1992. - 164 с.

- 44.
- 45.
- 46.
- 47.
- 48.
- 49.
- 50.
- 51.
- 52.
- 53.
- 54.
- 55.
- 56.
- 57.

- 58.
- 59.
- 60.
- 61.
- 62.
- 63.
64. Сает Ю.Е. Вторичные геохимические ореолы при поисках рудных месторождений. - М.: Наука, 1982. - 168 с.
65. Сает Ю.Е. Антропогенные геохимические аномалии (особенности, методика изучения и экологическое значение): Автореф... дис. д. геол.-мин. н. - М.: ИМГРЭ, 1982. - 53 с.
66. Сает Ю.Е. Методические основы эколого-геохимических исследований при геологоразведочных работах // Разведка и охрана недр, 1986, № 5, с. 35-39.
67. Сает Ю.Е., Онищенко Т.Л., Янин Е.П. Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. - М.: ИМГРЭ, 1986. - 99 с.
68. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. - М.: Недра, 1990. - 335 с.
69. Сает Ю.Е., Янин Е.П., Алексинская Л.Н. Геохимические критерии различия рудных и антропогенных потоков рассеяния в поверхностных водотоках // Гидрогеохимические методы поисков рудных месторождений и прогноза землетрясений (Мат-лы Второго междунар. симп. «Методы прикладной геохимии»). - Новосибирск: Наука, 1983, с. 87-95.
- 70.
- 71.
- 72.
- 73.
- 74.
- 75.
- 76.
- 77.
- 78.
- 79.
- 80.
- 81.
- 82.
- 83.
- 84.
- 85.

- 86.
- 87.
- 90.
- 91.
92. Янин Е.П. Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. - М.: Геоинформ-марк, 1993. - 50 с.
93. Янин Е.П. Введение в экологическую геохимию. - М.: ИМГРЭ, 1999. - 68 с.
94. Янин Е.П. Добыча и производство ртути в СНГ как источник загрязнения окружающей среды // Эколого-геохимические проблемы ртути (сборник научных статей). - М.: ИМГРЭ, 2000, с. 38-59.
95. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). - М.: ИМГРЭ, 2002. - 52 с.
96. Янин Е.П., Кашина Л.И., Тимошкин Г.А., Токарев И.В. Геохимические особенности потоков рассеяния химических элементов в горно-добывающих районах // Геохимия техногенеза, ч. II. - Иркутск, 1985, с. 108-11.
97. Янин Е.П., Тимошкин Г.А. Техногенные потоки рассеяния химических элементов в зоне влияния предприятий по добыче и обогащению полиметаллических руд // Геохимия ландшафтов (Тез. докл. Всес. сов.). - Новороссийск, 1986, с. 146-148.
98. Янин Е.П., Тимошкин Г.А. Техногенные потоки рассеяния химических элементов в поверхностных водотоках горно-промышленных ландшафтов // Биогеохимические методы при изучении окружающей среды. - М.: ИМГРЭ, 1989, с. 37-44.
- 99.
- 100.
- 101.
- 102.
- 103.
- 104.
- 105.
- 106.
- 107.
- 108.
- 109.
- 110.
- 111.
- 112.